토사 유동층의 특성에 따른 토석류 충격력의 수치모의

Numerical Simulation of the Impact Force of Debris Flow According to the Characteristics of the Liquefied Layer of Sediment

김성덕* · 이호진**

Kim, Sungduk*, and Lee, Hojin**

Abstract

The purpose of this study is to analyze the impact force of debris flow by conducting numerical simulations according to the characteristics of the liquefied layer. Numerical simulations were performed based on the Finite Difference Method, and continuity equations and momentum equations were applied as the governing equations. The impacts of debris flow in the downstream direction were analyzed according to the variance of the slope angle, water supply, and the paved length of sediment including fine and coarse fractures. The higher the slope, the greater the acceleration of the velocity of debris flow as well as the mobility of water particles and soil, which results in fluctuation. The increase in water supply caused the amplitude of fluctuation to become considerably high, and the peak value of the impact force was obtained. When the paved length of sediment was longer, the impact of debris flow was found to be high in the initial section, and when the paved length of sediment was shorter, the fluctuation was faster. The results of this study can be used to evaluate the stability of disaster mitigation structures by measuring the impact force of debris flow such as check dams in mountainous regions and can provide valuable information for establishing disaster prevention measures in mountain regions.

Key words : Debris Flow, Liquefied Layer, Impact Force, Check Dam

요 지

본 연구의 목적은 토사 유동층의 특성에 따른 토석류의 충격력을 수치모의를 이용하여 분석한 것이다. 수치모의는 유한차분법을 적용하였고, 지배방정식으로는 연속방정식과 운동량 방정식을 적용하였다. 조립토사와 세립토사를 포함하여 지형경사도의 변화, 공급유량의 변화 및 토사량의 변화에 대한 하류에서의 토석류에 의한 충격력을 분석하였다. 토석류 발생 위험도보다 높은 경사도일수록 토석류의 유속을 가속시켰으며, 물입자와 토사의 운동성이 증대됐고, Fluctuation이 발생하였다. 공급유량의 증가는 Fluctuation의 진폭을 상당히 크게 만들었으며, 충격력의 Peak값도 다수 발견되었다. 토사량의 포설길이가 긴 경우는 초기 구간에서 토석류의 충격력이 높게 나타났고, 반면에 포설길이가 짧은 경우에는 Fluctuation이 더 빨리 나타났고, 이 구간에서 포설길이가 긴 경우보다 그 크기가 더 크게 나타났다. 본 연구의 결과는 산지에서의 사방댐과 같은 토사재해 저감 구조물이 받는 토사의 충격력을 측정함으로써 재해저감 구조물의 안정성을 평가할 수 있고, 산지에서 방재대책을 세우는 데에도 중요한 정보를 제공할 것이다.

핵심용어 : 토석류, 유동층, 충격력, 사방댐

1. 서 론

우리나라의 지형은 64%가 산지로 되어 있고, 산지부에서의 난개발이 빈번하게 일어나고 있다. 이에 더하여 최근의 기후

변화는 태풍의 규모를 더욱 크게 만들고, 집중호우의 강도를 더 증대시키고 있다. 이에 따른 산지에서의 토사재해는 빈번하게 발생하며, 막대한 피해를 야기하고 있다. 따라서, 토석류와 같은 토사재해를 저감하기 위하여 산지 수로에 사방댐과

*정회원, 충북대학교 토목공학부 강사(E-mail: soundoug@hamail.net)

Member, Instructor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

**교신저자, 정회원, 충북대학교 토목공학과 부교수(Tel: +82-43-261-2403, Fax: +82-43-275-2377, E-mail: hojinlee@chungbuk.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

같은 재해저감 구조물이 설치되고 있다(Kim et al., 2015).

토석류 현상은 산악지형의 수로에서 발생하며 물과 토사 혼합물이 섞이면서 에너지가 증대되고 빠른 속도로 하류로 유하한다(DeGraff, 1994; Gori and Burton, 1996). 토석류의 거동을 해석하는 방법으로는 침식과 퇴적 모델을 결합한 Takahashi et al. (1992) 및 Egashira et al. (1997)의 방법이 있다.

토사재해는 시공간적으로 불균일적이고 돌발성을 갖기 때문에 정확한 예측에는 한계가 있고, 토석류와 같은 토사재해를 저감하기 위해서는 토사재해 위험지를 선정하고 이에 대한 예방사업의 시행이 매우 중요하다. 재해저감 대책 구조물로서 사방댐에 관한 연구로는 전도, 활동, 체제파괴 등에 대한 안정조건으로서의 콘크리트 설계안이 제시되었고(Yu, 2006a, 2006b; Chun, 2011), 토사유출량을 산정하여 신뢰성 함수를 가지고 사방댐의 안정성을 평가한 연구가 있다(Kwon, 2011). 또한, 토석류 내의 퇴적토사의 높이에 따른 외력을 설정하여 수치적으로 검토한 연구도 있다(Lin et al., 2014). 기존 국내 연구는 수압, 수중토압, 토압 및 퇴사압 등을 검토하였으나(Kim et al., 2009; Jung et al., 2010; Yoon and Lee, 2018), 토석류가 직접 유하하여 제체에 가하는 충격력에 대한 평가는 미미한 실정이다.

본 연구는 토사 유동층의 특성에 따른 토석류에 의한 충격력을 수치모의한 것이다. 수치모의는 시간변화에 대한 거동을 잘 재현할 수 있는 유한차분법을 적용하였고, 유체 및 토사 혼합물의 연속성을 잘 나타내는 연속방정식과 운동량 방정식을 적용하였다. 토석류의 유동층은 조립토사 뿐만 아니라 세립토사를 포함하여 설정하였고, 지형특성을 반영하기 위하여 공급유량을 일정하게 한 후에 지형경사도에 따른 토석류의 충격력을 분석하였다. 최근 기후변화영향으로 인한 집중호우의 증대를 해석하기 위하여 일정경사에서 상류단에서의 공급유량의 변화에 대한 하류단에서의 토석류의 충격력을 분석하였다. 마지막으로 산지에서 침식 또는 퇴적 가능한 토사량의 변화에 대하여 하류단에서의 토석류의 충격력을 분석하였다.

본 연구의 결과는 산지에서의 사방댐과 같은 토사재해저감 구조물이 받는 토사의 충격력을 측정함으로써 재해저감 구조물의 안정성을 평가할 수 있고, 이에 대한 보강대책을 세우는 데 중요한 정보를 제공할 것이다. 또한, 재해저감 구조물의 설계에 있어서 토석류에 의한 충격력을 보강함으로써 사방댐의 어깨길이 또는 댐고, 천단폭, 대수면 경사, 반수면 경사 등의 크기를 정하는 데 정보를 제공할 것이다. 이를 바탕으로 재해저감 구조물 설계를 통하여 산지에서 방재대책을 세우는 데에도 기여할 것으로 판단된다.

2. 기본이론

토석류 내의 토사 유동층은 물과 토사의 혼합물로서 외부

요인에 의해 산지에서 발생하여 하류로 이송될 때 강한 운동성을 나타낸다. 이 때, 토사 유동층은 Kinematic 성질로서 입자 운동 특성이 반영되며, 질량 운동을 하는 Dynamic 성질을 함께 갖는 연속체적 운동을 하며, 일회성이 아닌 지속적인 운동을 하는 파동 운동을 하게 된다. 토석류 거동을 해석하기 위해서는 질량보존법칙을 만족하는 유체 흐름의 연속식(Eq. (1))과 조립토사(Eq. (2)) 및 세립토사의 연속식(Eq. (3))을 고려해야 하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} = V_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial(ch)}{\partial t} + \frac{\partial(cuh)}{\partial x} = c_* V_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial\{(1-ch)c_f h\}}{\partial t} + \frac{\partial\{(1-ch)c_f u h\}}{\partial x} = (1-c_*)c_{f*} V_i \quad (3)$$

여기서, V_i 는 침식 또는 퇴적속도, g 는 중력가속도, h 는 수심, u 는 흐름의 단면 평균 유속이며, 수심과 유속의 곱으로 단위폭당 유량을 구할 수 있다. 또한, c 는 조립토사의 체적농도, c_* 는 정지하상에서 조립토사의 최대토사농도, c_f 는 세립토사의 체적농도, c_{f*} 는 정지하상에서 세립토사의 최대농도이다.

토석류 유동층에서 토사-물 혼합물의 운동특성을 이해하기 위해서는 운동량 방정식이 적용되어야 하며, Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있고, 이 식은 운동량 보존법칙을 만족한다.

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial\left(\frac{Q^2}{AB} + gA \cos \theta\right)}{\partial x} = gh \sin \theta - \frac{\tau_b}{\rho_m} \quad (4)$$

여기서, q 는 단위폭당 유량, Q 는 유량, A 는 흐름의 단면적, B 는 수로의 폭, ρ_m 는 유체와 토사 혼합물 밀도($\rho_m = (\sigma - \rho)c + \rho$), ρ 는 물의 밀도, σ 는 퇴적물 입자의 밀도, τ_b 는 저면 전단력, θ 는 하상경사이다.

토석류의 흐름은 석력형(Stony debris flow) 유동, 소류사 집합유동(Immature debris flow), 난류형(turbulent debris flow) 유동으로 구분할 수 있으며, 토석류의 석력형 유동은 토석류의 충격력에 크게 영향을 미치므로 석력형 유동의 저면 전단응력은 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있고(Kim et al., 2016), 토사입자의 평형농도식은 Eq. (6)으로 나타낼 수 있다(Takahashi et al., 1992). 이 때 정류와 등류 조건 그리고, $c > 0.4c_*$ 을 만족해야 한다.

$$\frac{\tau_b}{\rho_m} = \frac{1}{8} \left(\frac{d_m}{h} \right)^2 \frac{u |u|}{(c + (1-c)\rho/\sigma)(c_*/c)^{1/3} - 1^2} \quad (5)$$

$$c_{\infty} = \frac{\rho_m \tan \theta}{(\sigma - \rho_m)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (6)$$

여기서, d_m 은 퇴적층의 평균입경이고, ϕ 는 토사의 내부마찰각이다.

수로 바닥에서의 퇴적 토층은 시간에 따라 변화하게 되며, 토사의 침식 또는 퇴적에 의한 토층 두께의 변화식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + V_i = 0 \quad (7)$$

여기서, z_b 는 기준 수평면으로부터의 퇴적토층 두께이다. 침강속도를 고려하면 조립사의 퇴적 속도식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_* < w_{ok} \text{ 일 때,} \\ i_{sbk} = -w_{ok}C + i_{sbo} \frac{C}{C_L} C_{*Lmax} \quad (8)$$

$$u_* \geq w_{ok} \text{ 일 때,} \\ i_{sbk} = i_{sbo} \frac{C}{C_L} C_{*Lmax} \quad (9)$$

여기서, u_* 는 마찰속도, i_{sbk} 는 k 입자의 침강속도, i_{sbo} 는 벌크의 퇴적속도, C_{*Lmax} 는 석력만 퇴적하는 경우의 퇴적토 사용도이다. C_L 는 흐름 중의 토사체적 농도이다.

토석류 유동층에서 토사-물 혼합물 식과 석력형 토석류 흐름 식에서 토사입자의 평형농도식으로 토석류의 단위체적 중량을 구할 수 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_d = \{\sigma \cdot c_{\infty} + \rho \cdot (1 - c_{\infty})\} \cdot g \quad (10)$$

토석류의 충격력을 구하기 위해서는 토사-물 혼합물의 유동층에서 토석류의 동수압을 구해야 하며 다음과 같이 나타낼 수 있다. 각 나라별로 계수값에 따라 다양하게 설정되며 Eq. (11)은 오스트리아의 ASI (2014)가 제안한 식이며, Eq. (12)는 캐나다를 비롯한 아시아 여러 나라에서 사용하고 있다(Department of China, 2006; MLR, 2006).

$$P = 4.5 \rho u^{0.8} (gh)^{0.6} \quad (11)$$

$$P = \alpha \rho u^2 \quad (12)$$

여기서, α 는 계수를 나타내고, 캐나다의 경우는 1.0, 중국은 사방댐이 원통형인 경우 1.0, 사각형인 경우 1.33, 정사각형인 경우 1.47이고 일본도 1.0으로 사용하나 사방댐의 높이

가 15 m 미만일 때는 슬라이딩의 안전계수가 1.2로 적용되고, 사방댐의 높이가 15 m 이상일 때는 1.5로서 적용해야만 한다. 대만도 일본의 계수를 적용해서 사용하고 있다. 본 연구는 현재 많은 나라가 사용하는 1.0의 값을 사용하여 토석류의 충격력을 해석하였다.

3. 수치모의 결과 및 분석

3.1 수치모의조건

토사-물 혼합물은 하류로 유하하여 사방댐과 같은 재해저감 구조물에 충격을 가하는 데, 본 연구는 이 때 발생하는 토석류의 충격력을 분석한 것이다. 토사-물 혼합물 즉 토석류 유동층에서의 토사는 조립토사 뿐만 아니라 세립토사가 포함되어 있으며 본 수치모의에도 세립토사를 포함하여 연구를 수행하였다. 토석류는 강우에 의해 크게 영향을 받기 때문에 수로에 공급되는 공급유량은 600 cm³/sec, 800 cm³/sec, 1,000 cm³/sec으로 설정하였고, 이 공급유량에는 물 뿐만 아니라 세립사가 포함되어 있고, 공급지속시간은 약 20 sec로 설정하였다.

Fig. 1은 본 연구를 수행하기 위한 모식도로서 수로의 길이는 8 m이고, 폭은 10 cm, 기준면으로부터의 높이는 4 m이다. 수로의 경사는 14°, 16°, 18°, 20°로 변화시켜서 각각의 지형에 대한 모의를 진행하였다. 수로 상류부는 포화된 모래가 포설되어 있고 그 두께는 10 cm이며, 포설길이는 300 cm와 400 cm로 변화하였다. 조립토사와 세립토사의 평균입경은 각각 3.08 mm와 0.0842 mm이고, 모래입자 밀도는 2.65 g/cm³이다. 조립토사의 농도와 세립토사의 농도는 각각 65%와 35%이고 내부마찰각 $\tan \phi$ 는 0.7이다.

Fig. 1. Schematic Design for Numerical Experiment of Impact Force by Debris Flow

토석류는 빠른 시간 내에 하류로 유하하기 때문에 시간변화에 대한 토석류의 거동 분석이 필요하다. 따라서, 본 연구는 토석류에 대한 기본이론식을 유한차분법(Finite Difference Method, FDM)에 적용하여 시간 변화에 따른 토석류에 의한

충격력을 분석하였다.

본 연구의 수로는 직선 형태이며, 수로 위에서의 수면경사의 변화를 도시하였고, 수면 경사 상에서의 격자의 간격은 10 cm이다. 수로 상에서의 위치 격자는 총 80이고, 모래가 포설된 곳의 격자는 30 또는 40이 된다. 수면 상에서의 격자 테두리에는 유량과 유속이 배치되고, 수면 상 격자 중앙에는 토사체적 농도와 수심이 배치하게 된다. 이와 같은 수치 모의 조건으로 수치모델 계산 시간은 $t_1=60\text{sec}$ 간 수행되고, 계산을 위한 시간 간격은 $t_2=0.2\text{sec}$ 이며, 상류에서 발생한 토석류가 하류 끝단에 도착한 이후의 계산 시간은 $t_3=30\text{sec}$ 로 설정하여 수행하였다.

3.2 결과분석

3.2.1 수로경사 변화에 대한 충격력 분석

지형별 경사각도의 변화에 대한 하류단에서토석류의 충격력을 분석하기 위해서 Figs. 2~4에 나타내었다. Figs. 2~4는 상류단에 세립사를 포함한 유량이 20초간 지속적으로 공급될 때, 직선 수로의 경사변화에 따른 수로 하류단에서의 토석류의 충격력을 30초간 도시한 것이다. 이 때 공급유량은 각각 $600\text{ cm}^3/\text{sec}$, $800\text{ cm}^3/\text{sec}$, $1,000\text{ cm}^3/\text{sec}$ 이고, 수로의 경사는 14° , 16° , 18° , 20° 로 변화시켰고, 가로축은 시간의 변화를 나타내고 세로축은 토석류에 의한 충격력을 나타낸다.

Fig. 2에서 보면, 0에서 5초 구간에서 경사각도 18° 와 20° 만 토석류의 충격력이 높게 나타났고, 이 구간에서는 경사각도가 20° 인 경우만 충격력의 Peak가 나타났다. 또한, 경사각도 18° 와 20° 에서는 14초에서 20초 사이의 구간에 Fluctuation이 나타났으며, 이 구간에서 20° 의 경우는 몇 개의 Peak값이 나타났다. Fig. 3에서 보면, 토석류가 도달한 초기 구간 0~3sec구간에서 충격력이 크게 나타났고, 경사각도가 20° 인 경우는 14° 및 16° 인 경우보다 이 구간에서 3배정도 크게 나타났으며, 18° 와 20° 는 11초~20초 구간까지 충격력 값이 큰 Fluctuation이 다수 나타났고, 토석류 충격력의 Peak 값도 다수 발견됐다. 유량을 $1,000\text{ cm}^3/\text{sec}$ 로 증가시킨 Fig. 4에서 보면, Fig. 3의 그래프와 유사한 경향을 나타내지만, 0~3초 구간에서 충격력의 Peak값이 상당히 크게 나타났으며, 시간축 후반부에서 충격력의 Fluctuation이 시간적으로 앞당겨졌다. 이 구간(9초~15초)에서 토석류 충격력의 Peak값이 가장 높게 나타났으며, Peak값이 지속적으로 나타나고 있음을 발견하였다. 공급유량이 적은 경우 14° 와 16° 인 경우에서 토석류의 충격력이 상대적으로 작게 나타났으며, 경사도가 높을수록 충격력이 크게 나타났고, Fluctuation이 나타났다. 이는 토석류의 발생위험도가 15° 로서 14° 와 16° 는 15° 에 근접하기 때문이며(Kim et al., 2013), 이보다 경사도가 높으면 상당히 큰 토석류의 충격력이 나타났고, 이 후 지속적으로 토석류 충격력의 Peak 값이 지속적으로 하류에 도달하면서 피해를 야기하게 된다. 즉, 높은 경사도는 토석류의

유속을 가속시키게 되고, 물입자와 토사의 운동성이 커지게 되어 하류로 유하하고, 이후 계속해서 상류단에서 발달된 토석류는 연속적으로 하류로 유하하도록 에너지가 공급되기 때문에 Peak값을 갖는 Fluctuation이 발생하게 된다. 이 때 초기 시간에 도달한 토석류에 의한 충격력은 사방댐에 1회성으로만 가해지는 것이 아니라 이후 시간이 흘러서 다수의 충격이 연속적으로 가해지는 것을 알 수 있다.

Fig. 2. Impact Force at the end of Downstream Varying the Angle of the Channel for $Q_{inflow} = 600\text{ cm}^3/\text{sec}$

Fig. 3. Impact Force at the end of Downstream Varying the Angle of the Channel for $Q_{inflow} = 800\text{ cm}^3/\text{sec}$

Fig. 4. Impact Force at the end of Downstream Varying the Angle of the Channel for $Q_{inflow} = 1,000\text{ cm}^3/\text{sec}$

따라서, 사방댐의 규모 등을 설정할 때 최초 도달한 충격력의 크기뿐만 아니라, 이후 도달하는 연속적인 충격력의 Peak 값도 고려하여 설계할 필요가 있다고 판단된다.

3.2.2 공급유량 변화에 대한 충격력 분석

기후변화에 의한 집중호우의 증가에 따른 토석류의 충격력을 분석하기 위해 Figs. 5와 6에 나타내었다. Figs. 5와 6은 상류단에 세립사를 포함한 유량이 20초간 지속적으로 공급될 때, 공급유량 변화에 따른 수로 하류단에서의 토석류의 충격력을 30초간 도시한 것이다. 이 때 공급유량은 각각 $600 \text{ cm}^3/\text{sec}$, $800 \text{ cm}^3/\text{sec}$, $1,000 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 로 변화시켰고, 수로의 경사는 14° 와 16° 로 설정하였다.

Figs. 5와 6에서 보면, 토석류 발생 위험도보다 완만한 14° 의 경우에 공급유량이 증가되더라도 토석류 도달 3초간만 토석류의 충격력이 높게 나타났고, 이후에는 감소하는 추세를 보이고 있다. 반면에 경사각도가 토석류 발생 위험도보다 높은 16° 에서 공급유량의 증가는 고유량을 갖는 토석류를 증가시켜 빠른 시간 내에 하류로 유하함으로써 사방댐에 큰 충격을 가하게 된다. 이 때, 15초 부근에서 다시 한 번 충격력의 Peak값이 크게 발생하였고, fluctuation의 진폭이 상당히 크게 나타났다.

Fig. 5. Impact Force at the end of Downstream Varying the Water Supply for $\theta=14^\circ$

Fig. 6. Impact Force at the end of Downstream Varying the Water Supply for $\theta=16^\circ$

즉, 토석류 도달 초기에서의 Peak값과 이후 토석류의 Fluctuation이 발생할 때의 Peak값은 공급유량이 증가할수록 발생함을 알 수 있고, 토석류 충격력의 진폭도 크게 나타났는데, 이는 공급유량의 증가로 인해 토석류의 에너지를 증가시켜 토석류가 유하하면서 소멸하지 않고 계속 유지되다가

15초 부근에서 다시 한 번 가중된다는 것을 의미한다. 따라서, 기후변화에 의한 집중호우의 증가는 사방댐에 가하는 충격력의 크기 및 진폭이 크고 연속적으로 작용하기 때문에 사방댐 설계에 있어서 집중호우의 증가에 의한 토석류의 충격력의 변화를 고려해서 설계를 해야 된다고 판단된다.

3.2.3 상류단 토사량 변화에 대한 충격력 분석

토석류 유동층의 특성을 분석하기 위하여 상류부에 포함 된 모래의 포설길이를 300 cm , 400 cm 변화시키면서, 토석류의 충격력을 분석하였다. Figs. 7~10은 상류단에 세립사를 포함한 유량이 20초간 지속적으로 공급될 때, 상류단에 포설된 토사량의 포설길이 변화에 따른 수로 하류단에서의 토석류의 충격력을 30초간 도시한 것이다. 이 때 공급유량은 각각 $600 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 와 $800 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 로 설정하였고, 수로의 경사는 14° 와 18° 로 하였으며, 토사량의 포설길이는 300 cm 와 400 cm 로 하였다.

Figs. 7과 8에서 보면, 초기 0에서 3초 구간에서 충격력이 약간 높게 나타났으나 이후 일정하게 유지하다가 토석류가 소멸하는 것을 볼 수 있으며, 토사량의 포설길이 및 공급유량에 관계없이 이 양상은 비슷하게 나타나고 있다. 반면에 Figs. 9와 10에서 보면, 수로경사의 증가와 더불어서 공급유량의 증가는 토사량의 포설길이에 따라서 토석류의 충격력의 변화가 나타났다. 즉, 18° 의 수로경사에서 공급량의 증가는 초기구간(0~3초)에서 고유량이 함유된 토석류의 충격력이 크게 나타났고, Fluctuation에서의 Peak값도 크게 나타났다. 또한, 포설길이가 긴 경우는 포설길이가 짧은 경우보다 초기구간(0~4초)에서 토석류의 충격력이 높게 나타났고, 이 구간에서 역시 Peak값도 더 높게 나타났다. 반면에 토사량의 포설길이가 짧은 경우에는 Fluctuation이 더 빨리 발생하였고, 이 구간에서 포설길이가 긴 경우보다 그 크기가 더 크게 나타났다. 이는 토석류가 상류에서 발달되어 침식과 퇴적을 반복하면서 하류로 유하하기 때문이며(Takahashi, 2007), 토석류의 유량이 증가하면 토석류의 에너지가 증가하게 되고 토석류의 특성은 난류형으로 바뀌게 된다. 이에 의해 토석류에 포함된 토사는 소류사에서 부유사 형태로

Fig. 7. Impact Force at the end of Downstream Varying the Length of the Paved Sediment for $Q_{flow} = 600 \text{ cm}^3/\text{sec}$ and $\theta=14^\circ$

Fig. 8. Impact Force at the end of Downstream Varying the Length of the Paved Sediment for $Q_{inflow} = 800 \text{ cm}^3/\text{sec}$ and $\theta = 14^\circ$

Fig. 9. Impact Force at the end of Downstream Varying the Length of the Paved Sediment for $Q_{inflow} = 600 \text{ cm}^3/\text{sec}$ and $\theta = 18^\circ$

Fig. 10. Impact Force at the end of Downstream Varying the Length of the Paved Sediment for $Q_{inflow} = 800 \text{ cm}^3/\text{sec}$ and $\theta = 18^\circ$

바뀌기 때문에 토석류의 유속이 빠르게 되어 토사량의 길이가 작은 경우에 토석류 도달 초기보다는 이후의 Fluctuation 구간에서 더 크게 나타났다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 토사 유동층의 특성에 따른 토석류에 의한 충격력을 유한차분법을 적용하여 수치모의 하였고, 지배방정식으로는 연속방정식과 운동량 방정식을 적용하였다. 토석류의 유동층은 조립토사와 세립토사를 포함하였고, 지형경사도에 따른 토석류의 충격력 분석으로 지형특성을 반영

하였다. 기후변화로 인한 집중호우의 증대는 공급유량을 변화시킴으로 해석하였고, 토사량의 변화에 대한 분석으로 침식과 퇴적 특성을 분석하였다.

- (1) 수로경사 변화에 대한 분석을 해보면, 토석류 발생 위험도(15°)보다 높은 경사도일수록 토석류의 유속을 가속시켰으며(Ashda et al., 1978), 물입자와 토사의 운동성이 증대됐다. 또한, 상류단에서 발달된 토석류는 연속적으로 하류로 유하하면서 에너지가 공급되었기 때문에 Peak값을 갖는 Fluctuation이 발생하였다.
- (2) Fluctuation의 의미는 토석류에 의한 충격력이 사방댐에 1회성으로만 가해지는 것이 아니라 이후 시간이 흘러서 다수의 충격이 연속적으로 가해지는 것을 의미한다. 따라서, 사방댐의 규모 등을 설정할 때 최초 도달한 충격력의 크기뿐만 아니라, 이후 도달하는 연속적인 충격력의 Peak값도 고려하여 설계할 필요가 있다고 판단된다.
- (3) 공급유량 변화에 대한 분석에서 공급유량이 증가되더라도 경사각도가 위험도보다 낮은 경우 토석류의 충격력이 다소 높다가 감소하는 추세를 보이며, 경사각도가 높은 경우는 고유량을 갖는 토석류의 충격력이 높게 나타났다. 또한, 공급유량의 증가는 fluctuation의 진폭을 상당히 크게 만들었으며, 이는 토석류의 에너지가 공급유량으로 인해 증대되었음을 의미한다. 따라서, 기후변화에 의한 집중호우의 증가는 사방댐에 가하는 충격력의 크기 및 진폭이 크고 연속적으로 작용하기 때문에 사방댐 설계에 있어서 집중호우의 증가에 의한 토석류의 충격력의 변화를 고려해서 설계를 해야 된다고 판단된다.
- (4) 토사량 변화에 대한 분석에서 포설길이가 긴 경우는 포설길이가 짧은 경우보다 초기 구간에서 토석류의 충격력이 높게 나타났고, 반면에 포설길이가 짧은 경우에는 Fluctuation이 더 빨리 나타났고, 이 구간에서 포설길이가 긴 경우보다 그 크기가 더 크게 나타났다. 토석류의 에너지가 증가하면 토석류의 특성이 난류형으로 바뀌게 되고, 토석류에 포함된 토사는 소류사에서 부유사 형태로 바뀌므로서 Fluctuation을 발생시켰다고 판단된다.

본 연구의 결과는 산지에서의 사방댐과 같은 토사재해 저감 구조물이 받는 토사의 충격력을 측정함으로써 재해저감 구조물의 안정성을 평가할 수 있고, 재해저감 구조물의 설계에 대한 다양한 제원을 설정할 수 있으며, 재해저감 구조물 설계를 통하여 산지에서 방재대책을 세우는 데에도 중요한 정보를 제공할 것이다.

감사의 글

본 논문은 한국연구재단 이공학개인지초연구지원사업의 연구비지원(NRF-2017R1D1A3B03035477)에 의해 수행되었습니다.

References

- Austrian Standards Institute (ASI). (2014). *Collection of standards Protection against natural hazards*. The ONR 24800 series of standards on torrent, avalanche and rockfall protection structures, Austrian Standards plus GmbH, Wien. pp. 20-32.
- Chun, K.W. (2011). *Erosion Control Engineering*, Seoul, HyangMoonSa.
- DeGraff, J. (1994). The geomorphology of some debris flows in the southern Sierra Nevada, California. *Geomorphology*, Vol. 10, pp. 231-252.
- Department of China. (2006). *Soil mechanics & foundation engineering*. pp. 146-155.
- Egashira, S., Miyamoto, K., and Itoh, T. (1997). Constitutive equation of debris flow and their applicability. *Proceedings of 1st International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, ASCE, pp. 340-349.
- Gori, P.L., and Burton, W.C. (1996). *Debris flow hazards in the Blue Ridge of Virginia*. U.S. Geological Survey Fact Sheet. pp. 159-196.
- Jung, J.Y., Bang, D.S., and Chang, B.S. (2010). Study regarding a system improvement for that debris flow disaster reduction. *Proceeding of 36th Annual Conference*, Korean Society of Civil Engineer, pp. 2159-2162.
- Kim, S.D., Chun, K.W., Kim, S.W., and Jun, K.W. (2015). Analysis of impact force at the check dam for debris flow disaster. *Korean Review of Crisis & Emergency Management*, Vol. 11, No. 9, pp. 65-77.
- Kim, S.D., Oh, S.W., and Lee, H.J. (2013). The study of relationship between berm width and debris flow at the slope. *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 14, No. 11, pp. 5-12.
- Kim, S. D., Lee, H. S., Jun, B. H., and Jun, K. W. (2016). The analysis of liquefied-layer of debris flow on the various slope of parallel steep under the environmental soil condition. *Journal of the Korean Society of Environmental Technology*, Vol. 17, No. 3, pp. 266-274.
- Kim, W.H., Song, B.W., Kim, B.S., Kim, J.H., and Lee, K.H. (2009). The points of issue and countermeasure for sediment control dam designs. *Proceedings of International Symposium on Urban Geotechnics*, pp. 1057-1064.
- Kwon, H.J. (2011). Safety analysis of check dam according to sediment yield in Gangwon mountain region. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 11, No. 5, pp. 247-254.
- Lin, X, Yong, Y., Liu, J., and Zhao. Y. (2014). A tentative study on the stability of a check dam. In Y. Yang (Ed.), *Advances in Earth and Environmental Sciences* (pp. 35-56). WIT Press.
- MLR. (2006). *Specification of geological investigation for debris flow stabilization*. DZ/T0020, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, pp. 25-34.
- Takahashi, T. (2007). *Debris flow: Mechanics, prediction and countermeasures*. Taylor & Francis/Balkema, Tokyo, pp. 220-222.
- Takahashi, T., Nakagawa, H., Harada, T., and Yamashiki, Y. (1992). Routing debris flows with particle segregation. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118, No. 11, pp. 1490-1507.
- Yoon, J.H., and Lee, G.B. (2018). Development of crisis management manual for response to sediment disaster in urban area. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 3, pp. 363-372.
- Yu, B.O., Chang, B.S., Choi, S.I., and Choi, Y.K. (2006a). Debris flows remediation along the highway in 2006. *Proceedings of Korean Geo-Environmental Conference 2006*, Korean Geo-Environmental Society, pp. 115-127.
- Yu, B.O., Chang, B.S., Choi, S.I., Choi, Y.K., and Lee, J.H. (2006b). Debris flow case study and remediation in Kangwon Province. *Proceedings of 2006 Autumn Conference*, The Korean Society for Railway, pp. 1-10.
- Ashda, K., Takahashi, T., and Sawai, K. (1978). Evaluation of risk due to the debris flows. *Disaster Prevention Research Institute Annals*, Kyoto University Research Information Repository, Vol. 21, No. B-2, pp. 423-439. [芦田和男, 高橋 保, 澤井建二 (1978), 土石流危険度の評価法に関する研究, 京大防災年報, 21号B-2, pp. 423-439.]

Received	March 21, 2019
Revised	March 25, 2019
Accepted	April 1, 2019